

文章编号:1002-2082(2011)05-0817-05

消畸变成像折反射全景成像系统设计

范志刚¹, 王方博¹, 陈守谦¹, 冯俐铜²

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 天津航技术物理研究所, 天津 300192)

摘 要: 单视点折反射全景成像系统畸变较大, 通过计算反射镜面型可有效地实现折反射全景成像系统消畸变成像。在反射镜入射角与反射角呈线性关系的基础上, 推导适用于消畸变折反射全景成像的反射镜面型公式。为说明反射镜面型的准确性, 设计了 $F^\#$ 为 3.3, 视场为 138° 的消畸变成像折反射全景成像系统, 并利用实际像平面和虚拟像平面间的坐标映射关系, 实现了系统的消畸变设计。各视场 MTF 在奈奎斯特频率下均达到 0.6, 边缘视场相对畸变小于 4%。结果表明: 该面型可实现消畸变折反射全景成像, 反射角光线追迹法适用于折反射全景成像系统畸变评价, 为折反射全景成像系统消畸变设计提供了必要的模型和计算方法。

关键词: 光学设计; 折反射全景成像; 消畸变成像; 反射镜面型

中图分类号: TN202; TH703

文献标志码: A

Catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging

FAN Zhi-Gang¹, WANG Fang-Bo¹, CHEN Shou-Qian¹, FENG Li-Tong²

(1. Research Center of Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

Abstract: A catadioptric system uses a combination of lenses and mirrors placed in a carefully arranged configuration to capture a much wider field of view. However, images obtained by using a single-viewpoint catadioptric omnidirectional system have a large amount of visual distortion. To design a catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging, appropriate surfaces were presented. The surfaces preserved a linear relationship between the angle of incidence of light onto the surface and the angle of reflection onto the imaging device, as does a normal mirror. The reflective mirror and the lens were designed for a catadioptric omnidirectional camera with the F number 3.3 and the field of view 138° . The modulation transfer function is better than 0.6 at 66.7 lp/mm and the distortion is less than 4% over the whole active area of the image sensor. The deduction of the reflective surfaces offers an essential model and a computing method to design a catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging.

Key words: optical design; catadioptric omnidirectional imaging; undistorted imaging; reflective surfaces

引言

全景成像系统是指能够获得水平或者垂直方向上大于 180° 半球视场或者全 360° 视场的光学系

统。传统的光学成像系统遵循中心投影法, 中心投影是模仿人类观察外部世界的方式, 观察物体近大远小, 实现面到面的成像。旋转扫描技术、多

收稿日期: 2011-03-13; 修回日期: 2011-04-02

作者简介: 范志刚(1966—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心教授, 博士后, 主要从事气动光学、光电检测方面的研究工作。E-mail: fzg@hit.edu.cn

镜头拼接技术和鱼眼镜头均采用传统的中心投影法实现全景成像。平面圆柱投影法是指在三维空间视场和有限的二维像平面间建立一种新的投影关系, 将三维圆柱区域通过特殊的系统投影到二维平面圆环区域, 如图 1 所示, 在常规成像系统前加入反射面可达到圆柱投影的目的^[1]。折反射全景成像系统即利用反射镜与常规成像系统的组合, 实现大到半球视场的成像, 如图 2 所示。与传统的旋转扫描技术、多镜头拼接技术和鱼眼镜头实现大视场成像相比, 折反射全景成像系统具有成像实时性好、体积小、质量轻、成本较低等优势, 近年来发展较快, 在国防、民用、医疗等领域都有十分广阔的应用前景, 如飞机侦查吊舱、坦克探测与观瞄、机器人视觉、场景监视、视频会议等^[2]。

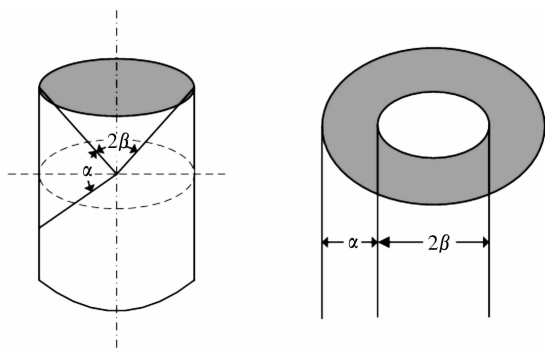


图 1 平面圆柱投影法示意图

Fig. 1 Model of flat cylinder perspective

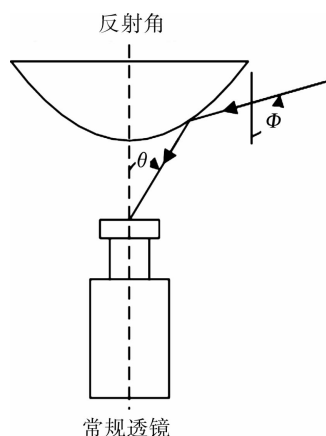


图 2 折反射成像系统示意图

Fig. 2 Model of catadioptric omnidirectional imaging system

折反射全景成像系统由反射镜和常规成像系统两部分组成, 根据投影成像模型可分为平行投影成像和透视投影成像^[3-4], 根据系统是否满足单视点约束可分为单视点全景成像和非单视点全景

成像。称反射镜反射前的光线为入射光线, 反射镜反射后的光线为反射光线, 假设成像透镜组满足小孔成像模型, 若反射光线经过小孔的入射光线相交于一点, 则此点称为单视点。入射光线的延长线均经过单视点时, 满足单视点约束条件, Nayar 推导了单视点约束方程, 其中面型为椭球面、双曲面和抛物面的反射镜可满足单视点约束条件^[5]。单视点全景成像的反射镜面型为二次曲面, 设计加工较为容易, 但其大视场畸变问题仍然存在。Chahl 等人 1997 年首次提出了非单视点全景成像的设计思想, 利用像点坐标与入射角呈线性关系来设计反射镜面型, 在大视场状态下完成成像系统的消畸变设计, 非单视点全景成像的反射镜面型通常为高阶旋转对称非球面^[6]。

文中利用非单视点消畸变全景成像的设计思想, 推导了消畸变折反射全景成像反射镜面型公式, 利用光学设计软件进行实例设计, 并用反射角光线追迹法对成像畸变进行评价。

1 畸变消除反射镜面型设计方法

折反射全景成像系统由一个旋转对称反射镜和一个传统成像透镜组组成, 设成像透镜组满足小孔成像模型^[7], 如图 3 所示。

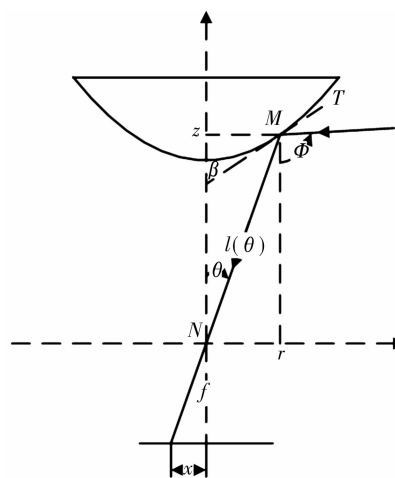


图 3 折反射成像系统反射镜光线几何关系示意图

Fig. 3 Schematic illustrating the operating principle of the reflective surface

旋转对称反射镜的对称轴(即笛卡尔坐标系 Z 轴)与传统成像系统光轴重合, 反射镜相对于 Z 轴旋转对称, 因此, 将三维笛卡尔坐标系用二维平面直角坐标系表示。设入射光线与垂直负方向的夹角 Φ 为入射角, 反射光线与垂直正方向的夹角 θ

为反射角。入射光线在反射镜 M 点处反射, 反射光线经过 N 点在像平面成像, N 点为理想小孔(即理想薄透镜组主点), 平面直角坐标系坐标原点与理想小孔重合。

旋转对称反射镜面型用极坐标系下参数 (l, θ) 和平面直角坐标系下参数 (r, z) 来表示, 其中 l 表示原点到反射镜任意点的距离, θ 表示反射光线与垂直正方向的夹角即反射角; r 表示沿水平坐标轴方向的距离 ($r = \sqrt{x^2 + y^2}$), z 表示沿 Z 轴方向的距离。

反射面面型在平面直角坐标系参数下表示为 $z = z(r)$, 如图 3 所示。反射面 M 点处的切线 T 与 Z 轴正方向的夹角为 β , 由图 3 可知:

$$\tan\beta = \frac{dr}{dz} \quad (1)$$

θ 对于反射面上任意点均唯一, 因此 θ 作为独立变量, 坐标原点到反射面任意点的距离 l 用 θ 表示为 $l = l(\theta)$; 用极坐标系下参数 (l, θ) 表示反射面面型, 平面直角坐标系下的参数 (r, z) 用极坐标系下的反射角 θ 表示为

$$r(\theta) = l(\theta) \sin\theta, z(\theta) = l(\theta) \cos\theta$$

将式(1)用极坐标系下参数 (l, θ) 表示, 可得:

$$\tan\beta = \frac{dr}{dz} = \frac{dr/d\theta}{dz/d\theta} = \frac{l' \sin\theta + l \cos\theta}{l' \cos\theta - l \sin\theta} \quad (2)$$

式中 $l' = dl/d\theta$, 故式(2)可整理为

$$\frac{dl}{l} = \frac{\sin\theta \tan\beta + \cos\theta}{\cos\theta \tan\beta - \sin\theta} d\theta \quad (3)$$

式(3)即为极坐标系下反射面面型公式的微分表达式。式(3)积分后消除积分常数, 将不定积分整理为定积分形式的反射面面型公式为

$$l(\theta) = l(0) \exp \int_0^\theta \frac{\sin\theta' \tan\beta + \cos\theta'}{\cos\theta' \tan\beta - \sin\theta'} d\theta' \quad (4)$$

式中 $l(0)$ 表示反射角 $\theta = 0$ 时坐标原点到反射面的距离。

式(4)即为极坐标系下反射面面型公式的积分表达式^[7]。式(4)的具体表达式, 依据 β 与 θ 的具体关系得出。反射角 θ 与像点坐标呈透视成像关系, 假设入射角与反射角呈线性关系, 则入射角与像点坐标呈比例透视成像关系, 即可达到消畸变成像的设计目标。入射角与反射角的线性关系可表示为 $\Phi = \alpha \cdot \theta$, 其中 α 为比例系数^[5]。从图 3 几何关系可以得出:

$$\beta = \frac{\theta + (\pi - \Phi)}{2} \quad (5)$$

将入射角与反射角的线性关系表示式 $\Phi = \alpha \cdot \theta$ 代入式(5), 可得:

$$\beta = \frac{\pi + (1 - \alpha)\theta}{2} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4), 即可推算出不同线性关系比例系数 α 时消畸变成像的反射面面型。

2 设计实例

2.1 光学设计

在计算反射镜面型时, 假设经反射镜反射的光线均通过理想小孔(即理想薄透镜组主点)成像; 但由于成像透镜组并非由理想薄透镜组成, 实际上, 光线经反射镜反射后通过成像透镜组前、后两主点成像, 后主点到像平面的距离即为成像透镜组的焦距 f ^[8]。

式(6)中 $\alpha = 3$ 时, $\beta = \pi/2 - \theta$, 代入式(4)可得 $l^2(\theta) = l^2(0)/\cos(2\theta)$, 将极坐标系下的反射面方程转化为平面直角坐标系下的方程为 $z^2 - r^2 = l^2(0)$, 反射镜面型方程在三维笛卡尔坐标系下的表示式即为 $z^2 - (x^2 + y^2) = l^2(0)$, 为双曲面反射镜。消畸变成像折反射全景成像系统初始结构参数如图 4 所示。选择 $l(0) = 60$ mm, 反射镜半口径 30 mm 作为初始结构, 则反射镜面型方程为 $z^2 - (x^2 + y^2) = 60^2$, 反射镜厚度 $h = 7.08$ mm。此面型的最大反射角 $\theta_{\max} = \tan^{-1}(r/(l(0) + h))$ 为 24.09° , 故此折反射全景成像系统最大入射角 $\Phi_{\max} = 3 \times \theta_{\max}$ 为 72.27° , 系统的可视范围为 $144.5^\circ \times 180^\circ$ 。常规成像系统初始参数确定时, 物方视场角应略大于 θ_{\max} , 为控制系统结构、减小探测器尺寸, 初始焦距 $f = 6$ mm。常规成像系统中孔径光阑应位于第一片透镜之前, 较小孔径光阑尺寸可起到限制光束口径, 消除杂散光的作用。

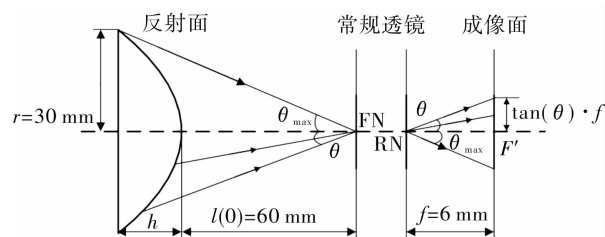


图 4 消畸变成像折反射全景成像系统初始结构参数示意图

Fig. 4 Model of the initial configuration parameter of the catadioptric system with undistorted imaging

根据上述反射镜面型及常规成像系统初始结

构,利用光学设计软件 CODEV 进行优化,反射镜到孔径光阑之间的距离为 $l(0)=60\text{ mm}$,设计完成后折反射全景成像系统光路图如图 5 所示。在优化过程中,当入射角 $\Phi > 69^\circ$, $F^\# < 3.3$ 时,调制传递函数下降较明显。图 6 表示物方视场角 69° , $F^\# = 3.3$ 时系统的调制传递函数。CCD 传感器尺寸为 $6.4\text{ mm} \times 4.8\text{ mm}$,像元尺寸 $7.5\text{ }\mu\text{m}$,故奈奎斯特频率为 66.7 lp/mm 。从图 6 可以看出,在奈奎斯特频率下,全视场内的调制传递函数仍能达到 0.6,符合设计要求。

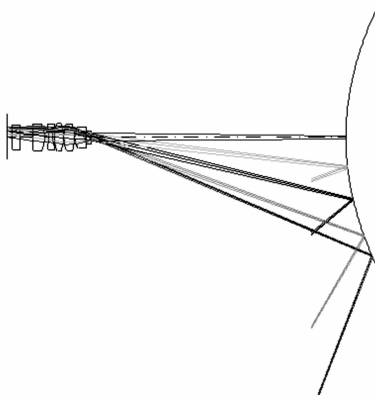


图 5 折反射全景成像系统光路图

Fig. 5 Optical layout of the catadioptric omnidirectional system

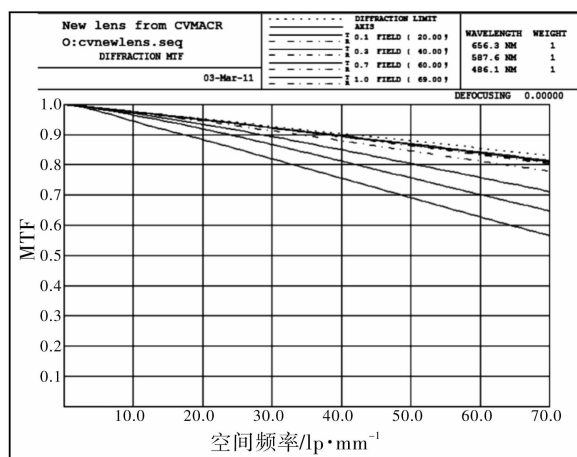


图 6 调制传递函数

Fig. 6 MTF

2.2 畸变评价

调制传递函数 (MTF) 衡量了除畸变外的其他像差,平面圆柱投影法的成像关系即为将三维圆柱区域成像到二维平面圆环区域,常规方形区域的畸变评价函数不再适用于折反射全景成像系统圆环区域成像的畸变评价。为解决这一问题,引

入反射角光线追迹法,该方法的目的是在像质评价中合理地描述折反射全景成像系统的畸变。

反射角光线追迹法是假设反射角为 θ 的主光线在垂直像面上的成像高度为 $\tan(\theta) \cdot f$,如图 4 所示。 $\tan(\theta) \cdot f$ 可以看成是相应主光线的理想像高,该主光线与像面的实际交点位置决定实际成像位置,主光线实际像高与理想像高的偏离量除以理想像高即为相对畸变,相对畸变表示式为

$$q' = \frac{r_i - \tan(\theta) \cdot f}{\tan(\theta) \cdot f} \quad (7)$$

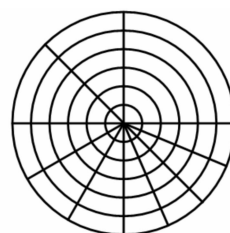
式中: q' 为相对畸变; r_i 为主光线实际像高; θ 为主光线出射角; f 为成像透镜组有效焦距。

成像为圆环区域的折反射全景成像系统,若想获取人眼熟悉的常规柱面全景图像,需对系统采集到的原始图像进行图像坐标变换。在反射镜面型计算中,反射角 θ 与像点坐标 $\tan(\theta) \cdot f$ 呈透视成像关系,入射角与反射角呈线性关系 $\Phi = \alpha \cdot \theta$,则入射角 Φ 与像点坐标 $\tan(\Phi/\alpha) \cdot f$ 呈比例透视成像关系。系统采集到的原始图像如图 7(a) 所示,将原始图像“拉直”^[5],从极坐标系变换为直角坐标系如图 7(b) 所示。图像坐标变换关系为

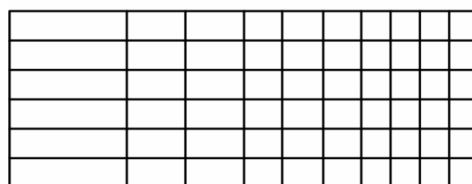
$$y = \sqrt{x_u^2 + y_u^2} \quad (8)$$

$$x = \frac{\arctan(\frac{x_u}{y_u})}{\pi/2} \cdot y \quad (9)$$

式中:原始图像中心坐标为 $(0,0)$, (x_u, y_u) 代表原始图像各点坐标, (x, y) 表示图像坐标变换后各点坐标。



(a) 原始图像

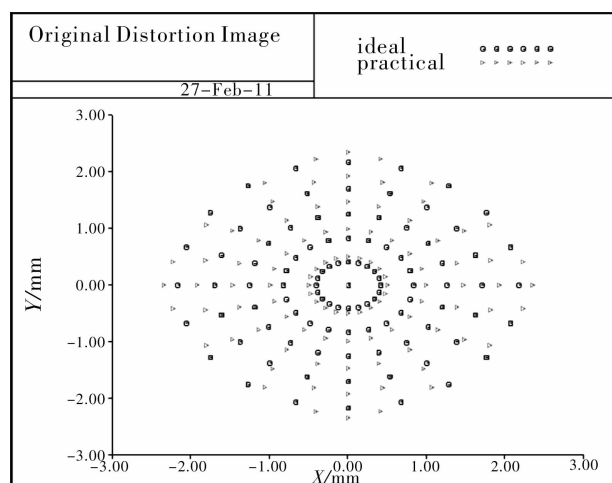


(b) 柱面图像

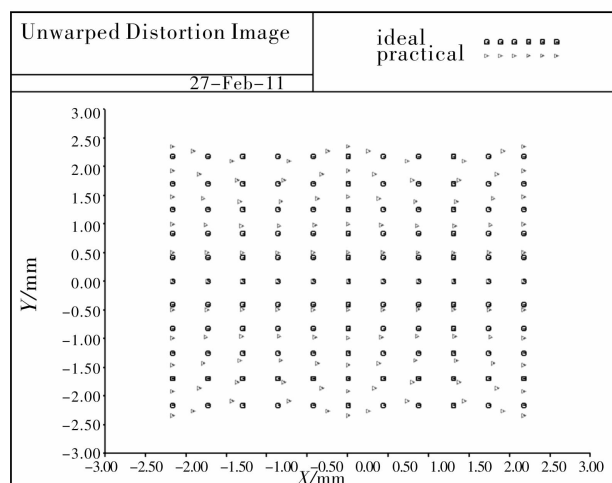
图 7 图像变换示意图

Fig. 7 Schematic of image transform

利用反射角光线追迹法获得的上述设计的折反射全景成像系统的畸变图如图8所示。○代表理想各视场主光线理想成像位置,▷代表各视场主光线实际成像位置,图8(a)表示像平面实际成像圆区域,图8(b)表示经图像坐标变换后的柱面全景图像。图8(a)中的理想像高数据与实际像高数据通过式(7)计算得到,相对畸变均小于4%。结果表明,该面型用于折反射全景成像系统可基本实现消畸变成像。



(a) 原始图像畸变图



(b) 柱面图像畸变图

图8 消畸变成像折反射全景成像系统畸变图

Fig.8 Distortion image of catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging

3 结论

以像点坐标与反射镜反射角呈透视成像关系

以及反射镜入射角与反射角呈线性关系为基础,推导消畸变成像折反射全景成像系统反射镜面型公式。输入初始参数条件下,根据公式计算了消畸变成像反射镜面型。利用推导的反射镜面型设计了消畸变成像折反射全景成像系统,并用反射角光线追迹法进行畸变评价。评价结果表明:该系统所采用的反射镜面型可较好地实现消畸变折反射全景成像。

参考文献:

- [1] 王道义, 黄大为, 邬敏贤, 等. 全景环形透镜原理与特点剖析[J]. 光学技术, 1998, 1(1):10-12.
WANG Dao-yi, HUANG Da-wei, WU Min-xian, et al. Principles and characteristics of panoramic annular lens[J]. Optical Technology, 1998, 1(1):10-12. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 吴振宇, 高明. 基于孔径分布概念的全景系统光学设计[J]. 应用光学, 2010, 31(2):174-179.
WU Zhen-yu, GAO Ming. Optical design of panoramic system based on distributed aperture concept [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(2):174-179. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 曾吉勇, 苏显渝. 双曲面折反射全景成像系统[J]. 光学学报, 2003, 23(9):1138-1142.
ZENG Ji-yong, SU Xian-yu. Hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(9): 1138-1142. (in Chinese with an English abstract)
- [4] NAYAR S K. Catadioptric omnidirectional camera [C]//1997 IEEE Computer Society Conference on Digital Object Identifier. [s. n]: CVPR, 1997: 482-488
- [5] BAKER S, NAYAR S K. A theory of single-view-point catadioptric image formation[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 35(2):175-196.
- [6] CHAHL J S, SRINIVASAN M V. Reflective surfaces for panoramic imaging[J]. Applied Optics, 1997, 36(31):8275-8285.
- [7] KWEON G, SEUNG H, KIM G, et al. Wide-angle catadioptric lens with a rectilinear projection scheme [J]. Applied Optics, 2006, 45(34):8659-8673.
- [8] NALWA V S. A true omni-directional viewer[R]. USA: Bell Laboratories Technical Memorandum, BL0115500-960115-01, 1996.